



SPOLM 2007

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 08 e 09 novembro de 2007.

A LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS DE TRANSPORTES PÚBLICOS

Gleicy Karen Abdon Alves

Instituto Militar de Engenharia - IME
Praça General Tibúrcio, 80
Praia Vermelha - Rio de Janeiro – RJ
gleicykaren@yahoo.com.br

Maria Cristina Fogliatti de Sinay

Instituto Militar de Engenharia - IME
Praça General Tibúrcio, 80
Praia Vermelha - Rio de Janeiro – RJ
cristinasinay@ime.eb.br

Resumo

Um dos serviços de extrema importância para o desenvolvimento e para a própria subsistência da sociedade moderna é o serviço de transporte público, que, principalmente em cidades de países em desenvolvimento é deficiente e seu funcionamento provoca passivos ambientais na área de influência do mesmo. Assim sendo, esse serviço deve ter sua operação controlada e monitorada para evitar maiores prejuízos. Este controle operacional que compreende a avaliação de diversos aspectos relacionados ao meio ambiente define-se como desempenho ambiental e inclui variáveis como idade média da frota, segurança, conforto e limpeza, parâmetros estes de natureza quantitativa e qualitativa e de avaliação “imprecisa”. Do exposto, verifica-se a pertinência de utilizar a metodologia da lógica fuzzy no objetivo de propor um índice de desempenho ambiental associado ao serviço de transporte público, objetivo deste trabalho. O resultado final, o índice de desempenho ambiental associado ao trecho da linha sob análise, pode ser usado tanto pelas operadoras dos serviços para detectar e ajustar os aspectos que influenciam negativamente o meio ambiente, quanto pelo órgão público para apoiar no processo de fiscalização.

Palavras-chaves: Sistemas de transportes públicos, Lógica fuzzy

Abstract

One of the services of extreme importance for the development and the proper subsistence of the modern society is the service of public transport, that, mainly in cities of developing countries is deficient and its functioning provokes ambient liabilities in the area of influence of exactly. Thus being, this service must have its operation controlled and monitored to prevent greater damages. This operational control that understands the evaluation of diverse aspects related to the environment is defined as ambient performance and includes 0 variable as average age of the fleet, security, comfort and cleanness, parameters these of quantitative and qualitative nature and "inexact" evaluation. Of the displayed one, it is verified relevancy to use the methodology of the logic fuzzy in the objective to consider an index of associated ambient performance to the service of public, objective transport of this work. The final result, the index of associated ambient performance to the stretch of the line under analysis, can be used in such a way for the operators of the

services to detect and to adjust the aspects that influence the environment negative, how much for the public agency to support in the fiscalization process.

Keywords: Systems of public transports, Logic fuzzy

1. INTRODUÇÃO

A implantação e a operação de empreendimentos de transporte em geral, principalmente o transporte público urbano, têm levado os grandes centros urbanos à situações de degradação ambiental, causando assim, prejuízos à população usuária, à população do entorno e ao próprio empreendimento.

A avaliação de efeitos resultantes de práticas e políticas anteriores mal concebidas, no que se relaciona às atividades e serviços realizados pelo transporte público urbano, constitui atualmente um fator extremamente importante quando de um planejamento urbano sustentável.

Entende-se por mobilidade urbana sustentável “o resultado de um conjunto de políticas de transporte e circulação que visa proporcionar o acesso amplo e democrático ao espaço urbano, através da priorização dos modos de transporte coletivo e não-motorizados de maneira efetiva, socialmente inclusiva e ecologicamente sustentável” (Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana, SEMOB, 2003).

Muitos efeitos adversos ao meio ambiente gerados pelas atividades e serviços realizados pelos transportes públicos urbanos são provenientes da falta do gerenciamento das atividades de controle e monitoramento dos impactos ambientais, isto é, “...alterações das propriedades físicas, químicas e/ou biológicas do meio ambiente, provocadas direta ou indiretamente por atividades humanas podendo afetar a saúde, a segurança e/ou a qualidade dos recursos naturais” (Fogliatti *et al.* 2004). Verifica-se, então, a necessidade desse serviço ter sua operação controlada e monitorada para evitar maiores prejuízos, além do acompanhamento da geração de passivos ambientais gerados por tais atividades. O passivo ambiental corresponde às obrigações da operadora do serviço contraídas voluntária ou involuntariamente, em decorrência de ações passadas ou presentes, as quais envolvem a organização e o meio ambiente em que está inserida e que, por conseguinte, exigirão a entrega de ativos ou a realização de serviços de controle, preservação e recuperação do meio ambiente (Paiva, 2004).

Este controle operacional que compreende a avaliação de aspectos diversos relacionados ao meio ambiente define-se como desempenho ambiental e inclui variáveis como idade média da frota, conforto, Número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais, número de programas de manutenção e regulagem do motor e exaustor aplicados aos veículos por mês, segurança e limpeza, dentre outros, parâmetros estes de natureza quantitativa e qualitativa e de avaliação “imprecisa”. Após realizada esta avaliação, podem ser priorizadas as intervenções a serem realizadas.

Assim, tem-se um conjunto de fatores interconexos que devem ser tratados diferenciadamente caso se queira ter cidades modernas e ambientalmente sustentáveis, quanto aos serviços de transportes empregados. Estes fatores incluem governos e agências fiscalizadoras, operadores de linhas urbanas, motoristas, usuários das diversas linhas e a população do entorno que convive e sofre as conseqüências da falta de integração racional entre estes componentes. Aos governos cabem os planejamentos e as políticas dos transportes que incluem a concessão das linhas e seus “traçados”. Às agências fiscalizadoras cabe a obrigação de verificar o conforto, o respeito e a segurança que estão sendo oferecidos aos usuários e à população do entorno tanto nos veículos quanto nos pontos de parada e inclui a obrigação de avaliar todo o arcabouço físico da linha: estado dos veículos (idade, equipamentos de segurança, limpeza), estado dos pontos de parada (distância entre eles, equipamentos disponíveis para os usuários), adequabilidade do veículo à rota, adequabilidade da frequência praticada à demanda ao longo da rota, etc. Aos operadores das linhas cabe a obrigação de atender os quesitos impostos pelos governos investindo na manutenção dos veículos e principalmente na educação dos motoristas quanto ao tratamento dado aos usuários da linha, principalmente àqueles com necessidades especiais.

Ressalta-se também que os usuários e a população do entorno devem dar apoio aos órgãos fiscalizadores, relatando fatos indesejados para o que deveriam ser abertos canais de comunicação eficientes.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o de propor um índice de desempenho ambiental associado ao serviço de transporte público urbano.

Assim, após a definição de indicadores ambientais apropriados relacionados à frota, ao serviço, aos pontos de paradas e aos terminais, os mesmos são representados em uma arquitetura neural, sendo então necessário construir os conjuntos *fuzzy* a serem empregados nos processos de fuzzificação e defuzzificação, assim como as regras de inferência e os correspondentes fatores de certeza.

O resultado final, o índice de desempenho ambiental, pode ser usado tanto pelas operadoras dos serviços para detectar e ajustar os aspectos que influenciam negativamente o meio ambiente, quanto pelos órgãos públicos pelo apoio no processo de fiscalização.

Do exposto, verifica-se a pertinência de utilizar a metodologia da lógica *fuzzy* para a obtenção do índice proposto.

3. LÓGICA FUZZY

O conceito de lógica *fuzzy* foi introduzido na década de 60, quando Lotfi Zadeh, professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação da Universidade da Califórnia em Berkeley, trabalhava com problemas de classificação de conjuntos que não tinham fronteiras bem definidas, baseado na convicção de que a incerteza é inerente às ações e acontecimentos da vida humana e que há poucas possibilidades de que modelos matemáticos exatos obtenham sempre sucesso.

Segundo Braga et al. (1995) citados por Cury (1999), a lógica *fuzzy* é uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real, nascida no desejo profundo de se conhecer melhor os processos mentais do raciocínio. Ainda para Cury (1999), a lógica *fuzzy* é um superconjunto da lógica convencional (lógica binária ou Booleana) que se expandiu para tratar o conceito da verdade parcial, isto é, valores compreendidos entre o “completamente verdadeiro” e o “completamente falso”.

Em outras palavras, a tecnologia *fuzzy* consiste no tratamento matemático de sistemas onde a subjetividade e as características ambíguas das variáveis processadas tornam a lógica clássica de difícil modelagem e aplicação. Conjugada com a heurística, um conjunto de regras apoiadas no processo de realização de tarefas por meio do “conhecimento” obtido na solução de certos problemas, a lógica *fuzzy* pode ser utilizada para a construção da arquitetura do pensamento consensual e humano, incorporando assim a experiência de especialistas (Filippo et. al 2005). Para a lógica *fuzzy*, então uma variável não tem apenas um único estado atual, mas n estados, cada um com diferentes graus de associação ou de pertinência.

Um sistema *fuzzy* típico consiste de uma base de regras, de funções de pertinência e de procedimentos de inferência, conforme mostrado na Fig. 1:

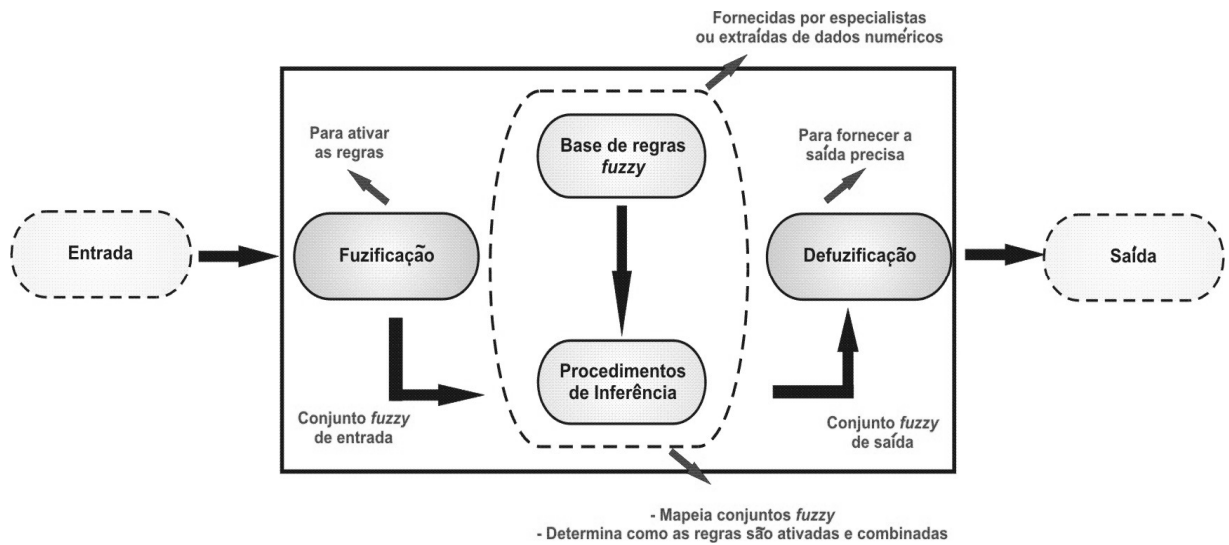


Figura 1 - Estrutura geral de um sistema de inferência fuzzy

O campo de aplicação da lógica *fuzzy* é muito variado, encontrando-se exemplos do uso desta metodologia em administração de projetos, formação de preços de produtos, diagnósticos médicos, previsão de vendas, análise de mercado, identificação criminal, orçamento de capital, avaliação de aquisição de empresas, processamento de informações, controle de qualidade e em outros assuntos que envolvem a tomada de decisão, como controle do tráfego, sistemas de produção, avaliação ambiental de alternativas de projetos de transporte urbano e rodoviário e outros (Von Altrock (1995), Jamshidi (1997), Cury (1999), Komarova (2000) e Goudard (2001)).

A entrada para o sistema pode ser um valor preciso (quando deriva de um processo de medição) ou um conjunto *fuzzy* (geralmente quando provém de um observador humano ou na forma de uma base de dados, como por exemplo, os questionários). Para adequar a entrada ao sistema, faz-se a fuzzificação, que é o processo de transformação das variáveis de entrada em graus de pertinência ou de certeza, produzindo uma interpretação ou qualificação da mesma. O processo de fuzzificação consiste em associar um vetor lingüístico aos possíveis valores dos parâmetros de entrada para produzir um conjunto *fuzzy* que retrate a imprecisão do problema sob análise, isto é, realizar um mapeamento dos dados de entrada. No estágio da fuzzificação ocorre também a ativação das regras de inferência, isto é, a combinação das mesmas.

O processo de inferência *fuzzy* consiste na integração de parâmetros por meio de regras do tipo SE-ENTÃO, regras estas definidas em função dos parâmetros a serem utilizados.

Para a parte SE da regra, a inferência *fuzzy* é computada com base na Eq. 1, qual seja:

$$GdCPS = FC_n \cdot \text{MIN}_i \{ GdCPE_i \} \quad (1)$$

onde:

GdCPS = grau de certeza do parâmetro de saída;

FC_n = fator de certeza da regra n correspondente;

$GdCPE_i$ = grau de certeza do parâmetro de entrada i; $i = 1, 2, 3$

Já a computação da parte ENTÃO da regra é baseada na Eq. 2, qual seja:

$$GdCPS = \text{MAX}_n (FC_n \cdot \text{MIN}_i \{ GdCPE_i \}) \quad (2)$$

Com isto, é gerado um vetor lingüístico com seu respectivo GdC para os parâmetros intermediários e final.

Em algumas aplicações, uma interpretação lingüística do resultado é suficiente. Em outras, um valor numérico como variável de saída é solicitado, como por exemplo, para se decidir sobre a aceitação ou rejeição de um projeto, ou mesmo para o caso de comparações ou estabelecimento de um ranking. Desta forma, nos casos em que um resultado numérico é necessário, o processo de defuzzificação deve ocorrer após a inferência *fuzzy*. As variáveis de saída, tanto as intermediárias quanto a final, são geradas pelos blocos de inferência na forma de variáveis lingüísticas. No passo final, obtém-se um vetor lingüístico associado ao vetor de graus de pertinência.

Existem vários métodos de defuzzificação, entre eles o centro dos máximos. Este método determina o valor mais típico para cada termo e então computa o valor que reflete o melhor compromisso com o resultado da inferência *fuzzy* utilizando como pesos os GdC do resultado lingüístico da inferência *fuzzy*. Assim, o valor de melhor compromisso é aquele que equilibra os pesos. Este resultado pode ser obtido, segundo a Eq. 3:

$$D = \frac{\sum_{n=1}^N \text{GdC}_n \cdot X_n}{\sum_{n=1}^N \text{GdC}_n} \quad (3)$$

onde:

GdC_n = grau de certeza dos termos lingüísticos da variável de saída final;

X_n = valores da componente sob análise que correspondem aos máximos dos conjuntos *fuzzy*;

n = regra;

N = número total de regras

Cury (1999) propôs conjuntos *fuzzy* a serem utilizados no processo de defuzzificação. Estes conjuntos são os da Fig. 2 a seguir.

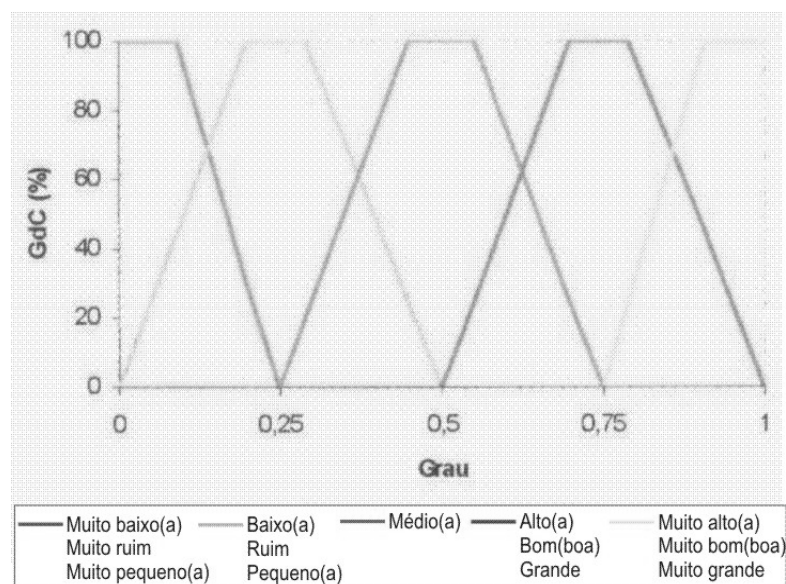


Figura 2 - Conjuntos *fuzzy* para defuzzificação

Fonte: Cury (1999)

4. PROPOSTA PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO AMBIENTAL ASSOCIADO AOS SISTEMAS DE TRANSPORTES PÚBLICOS URBANOS POR ÔNIBUS

Com base no trabalho de Von Altrock e Krause (1993) *apud* Cury (1999), uma das principais recomendações ao se utilizar a lógica *fuzzy* em arquiteturas de redes neurais é o agrupamento de um número reduzido de parâmetros de entrada mesmo que isto implique na construção de maior número de camadas intermediárias. Os mesmos autores recomendam que não sejam agregados mais que três variáveis em cada nó da rede. Isto facilita a construção da base de regras.

Os impactos ambientais negativos associados às atividades de um sistema de transporte público urbano por ônibus, são integrados de forma a constituírem indicadores. Pode ser observado que enquanto 12 deles, quais sejam, idade média da frota, consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro, número de programas de manutenção e regulagem do motor e exaustor aplicados aos veículos por mês, número de programas de educação dos motoristas para melhor se relacionarem com os usuários disponibilizados pela empresa por mês, conforto, número de equipamentos de segurança presentes nos veículos, número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais, frequência da linha, tarifa cobrada, número de equipamentos presentes nas paradas, quantidade de produtos líquidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens e quantidade de produtos sólidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens, têm índole quantitativa, enquanto os 7 restantes têm índole qualitativa.

Assim sendo, a arquitetura proposta contém um total de 31 parâmetros, sendo 19 de entrada, dos quais 12 são quantitativos e 7 são qualitativos. A estrutura a representar o problema sob análise é a apresentada na Fig. 3 a seguir.

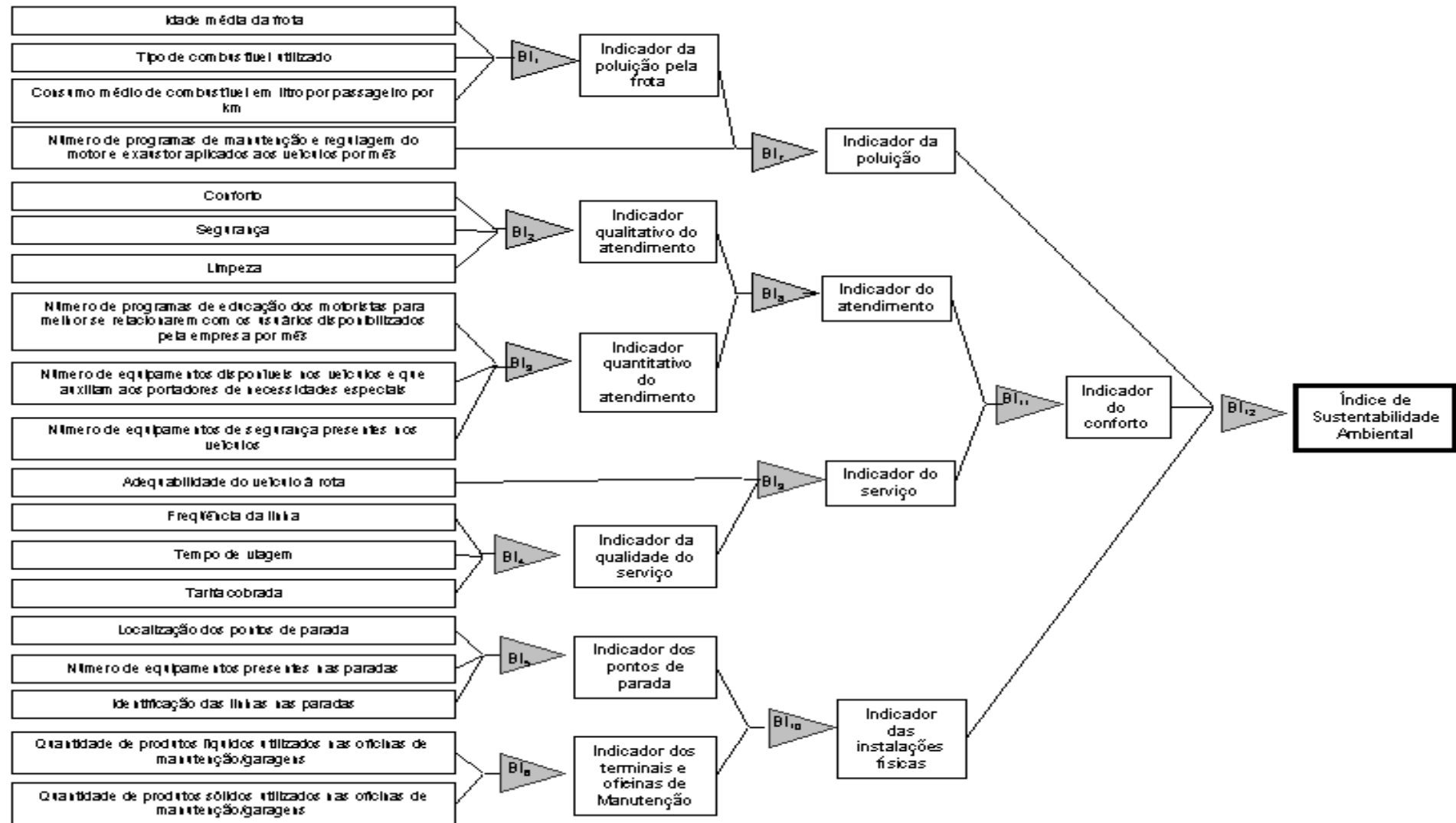


Figura 3 - Arquitetura do problema a ser considerado

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Foram caracterizados os parâmetros qualitativos e quantitativos decorrentes dos serviços de transportes públicos urbanos, conforme mostra a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Descrição das variáveis de entrada

INDICADOR	TIPO	MENSURAÇÃO	TERMO LINGÜÍSTICO		
Idade média da frota	Quantitativo	anos/veículo	RUIM	BOA	EXCELENTE
Consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro	Quantitativo	l/pass/km	RUIM	MÉDIO	EXCELENTE
Número de programas de manutenção e regulagem do motor e exaustor aplicados aos veículos por mês	Quantitativo	unidade/mês	RUIM	REGULAR	BOM
Número de programas de educação dos motoristas para melhor se relacionarem com os usuários disponibilizados por mês pela empresa	Quantitativo	unidade/mês	RUIM	REGULAR	BOM
Conforto	Quantitativo	área em m ² de ocupação por passageiro no vão central	RUIM	MÉDIO	EXCELENTE
Número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais	Quantitativo	unidade/veículo	RUIM	REGULAR	BOM
Número de equipamentos de segurança presentes nos veículos	Quantitativo	unidade/veículo	RUIM	REGULAR	EXCELENTE
Frequência da linha	Quantitativo	intervalo entre atendimentos em minutos	RUIM	REGULAR	EXCELENTE
Tarifa cobrada	Quantitativo	R\$/passageiro	RUIM	REGULAR	EXCELENTE
Nº de equipamentos presentes nas paradas	Quantitativo	unidade/parada	RUIM	REGULAR	BOM
Quantidade de produtos sólidos utilizados nas oficinas de manutenção / garagens	Quantitativo	quilos/mês	RUIM	MÉDIA	BOA
Quantidade de produtos líquidos utilizados nas oficinas de manutenção / garagens	Quantitativo	litros/mês	RUIM	MÉDIA	BOA
Tipo de combustível utilizado	Qualitativo	-----	RUIM	REGULAR	BOM
Segurança	Qualitativo	-----	RUIM	REGULAR	BOA
Limpeza	Qualitativo	-----	RUIM	REGULAR	BOA
Adequabilidade do veículo à rota	Qualitativo	-----	RUIM	REGULAR	BOA
Tempo de viagem	Qualitativo	-----	RUIM	ACEITÁVEL	BOM
Localização dos pontos de parada	Qualitativo	-----	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIA	BOA
Identificação das linhas nas paradas	Qualitativo	-----	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIA	BOA

4.2 CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*

Definida a arquitetura do processo e conseqüentemente os parâmetros a serem mensurados para a construção dos conjuntos *fuzzy* e posterior fuzzificação, foram elaborados e aplicados questionários a especialistas do setor de transporte público, como gerentes de empresas operadoras, gerentes de oficinas de manutenção e também a usuários da linha: enquanto os usuários são mais receptivos e têm mais facilidade para opinar sobre os termos qualitativos, os especialistas podem facilmente estimar quantitativamente os parâmetros. A estes questionários foi dado um tratamento estatístico, onde foram computadas as freqüências das respostas positivas para cada uma das alternativas, o que permitiu que fossem construídos os conjuntos *fuzzy*.

Como exemplo para o indicador “Idade média da frota”, foi solicitado a 20 especialistas associar os termos lingüísticos excelente, boa e ruim a idades médias da frota entre 0 e 15 anos, subdivididos em subintervalos. De posse das respostas obtidas foram computadas as freqüências das respostas positivas para cada intervalo e para cada termo lingüístico. Estas freqüências atuam como graus de certeza associados. Para a idade média da frota obtiveram-se os graus de certeza da Tabela 2, os que originaram os conjuntos *fuzzy* da Fig. 4:

Tabela 2 - Graus de certeza para “Idade média da frota”

IDADE MÉDIA DA FROTA (anos/veículo)	EXCELENTE	BOA	RUIM
0 a 2	1,00	0,00	0,00
2 a 4	0,70	0,40	0,00
4 a 6	0,50	0,47	0,16
6 a 8	0,00	1,00	0,26
8 a 15	0,00	0,07	1,00

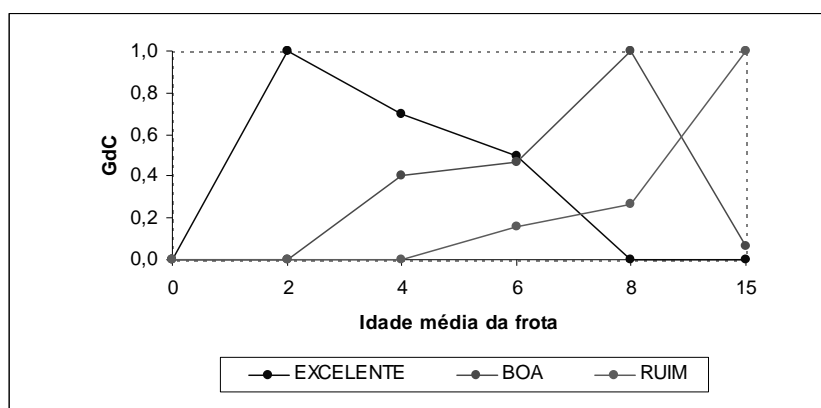


Figura 4 - Conjuntos *fuzzy* para Idade média da frota

Idêntico tipo de tratamento foi dado a todos os indicadores quantitativos, obtendo-se os conjuntos *fuzzy* apresentados nas Figs. 5 a 15 a seguir.

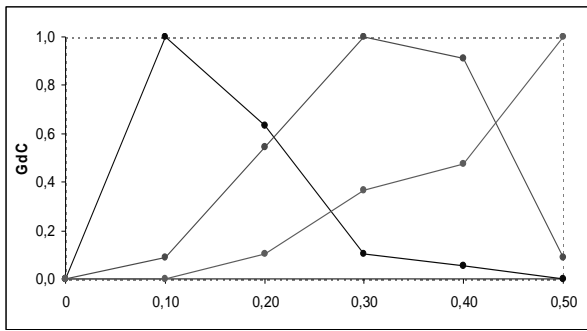


Figura 5 - Consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro

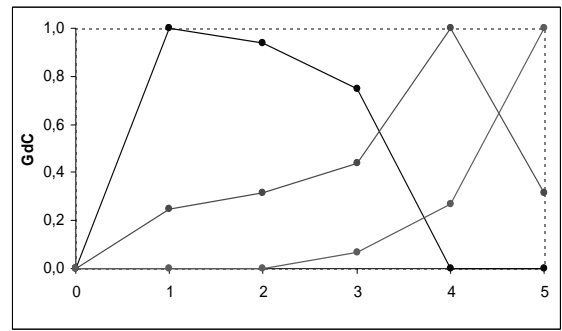


Figura 6 - Número de programas de manutenção e regulação do motor e exaustor aplicados aos veículos por mês

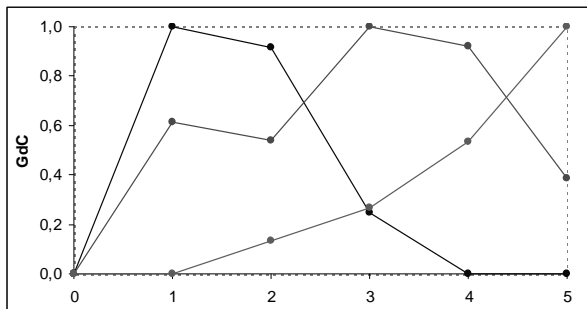


Figura 7 - Número de programas de educação dos motoristas para melhor se relacionarem com os usuários disponibilizados por mês pela empresa

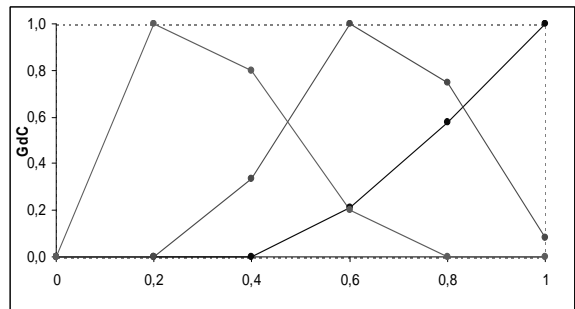


Figura 8 - Conforto

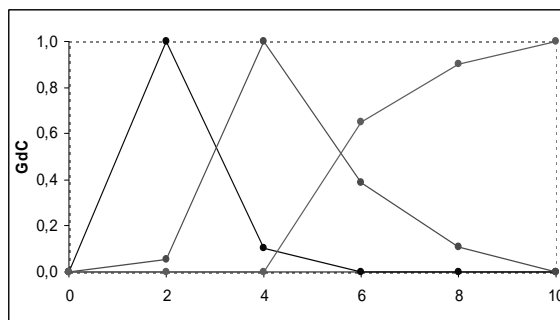


Figura 9 - Número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais

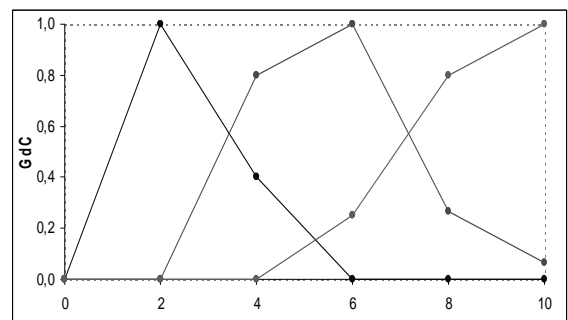


Figura 10 - Número de equipamentos de segurança presentes nos veículos

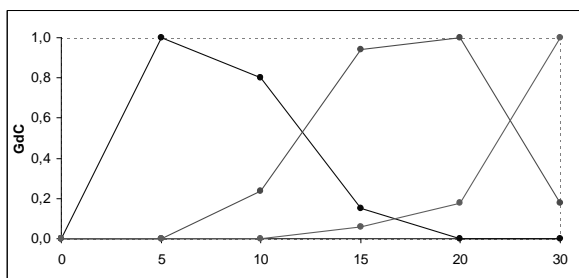


Figura 11 - Frequência da linha

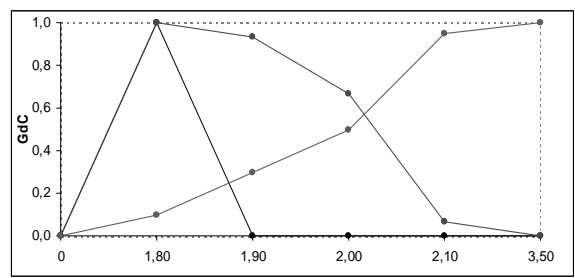


Figura 12 - Tarifa cobrada

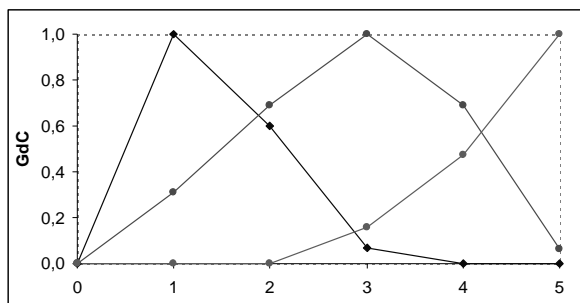


Figura 13 - Número de equipamentos presentes nas paradas

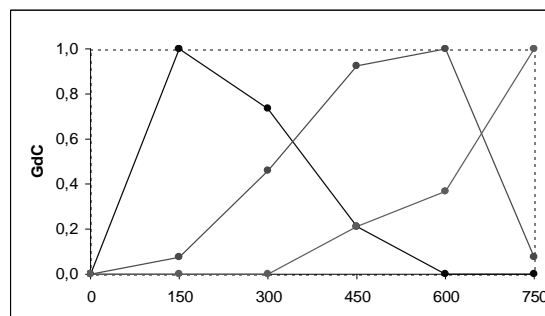


Figura 14 - Quantidade de produtos sólidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens

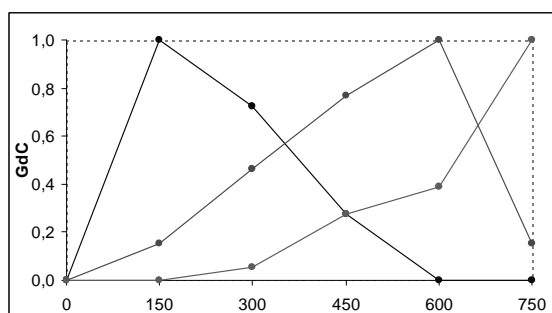


Figura 15 - Quantidade de produtos líquidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens

Já os conjuntos *fuzzy* para os indicadores qualitativos foram definidos por Cury (1999), com base numa amostra de 30 pessoas, que atribuíram termos lingüísticos para todos os valores da escala de 0 a 10, dentro de um contexto genérico. Estes conjuntos encontram-se representados na Fig. 16.

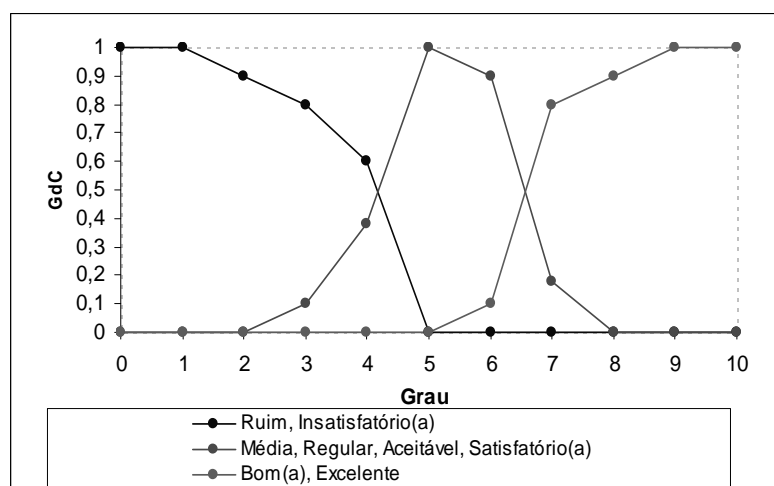


Figura 16 - Conjuntos *fuzzy* para os indicadores qualitativos

4.3 INFERÊNCIA FUZZY

Para cada regra foi definido um fator de certeza (FC). Como exemplo, para o primeiro bloco de inferência, no qual a agregação engloba os parâmetros “Idade média da frota”, “Tipo de combustível” e “Consumo de combustível/pass/km”, têm-se para a regra 1, a seguinte combinação: “Idade média da frota → Excelente”; “Tipo de combustível utilizado → Ruim”; “Consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro →

Excelente”, dando como resultado: “Indicador da poluição pela frota → Bom”, com fator de certeza (FC_n) associado 0,9, como mostra a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Base de regras e respectivos FC para o Bloco de Inferência 1

REGRA	SE		ENTÃO		FATOR DE CERTEZA (FC)
	<i>Idade média da frota</i>	<i>Tipo de combustível utilizado</i>	<i>Consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro</i>	<i>Indicador da poluição pela frota</i>	
1	EXCELENTE	RUIM	EXCELENTE	BOM	0,9

A partir desta etapa, é realizado então o processo de defuzzificação. Podem ser destacados alguns métodos de defuzzificação, como o método do centro dos máximos e do centro das áreas.

Para que haja uma melhor compreensão das diversas etapas do procedimento proposto, será desenvolvido a seguir um estudo de caso.

5. ESTUDO DE CASO

O meio de transporte sob análise, o ônibus, é o principal veículo de transporte público urbano de passageiros no Brasil, sendo que na cidade do Rio de Janeiro, 81% da população utiliza este modo (IBOPE, 2004).

A empresa operadora forneceu dados relativos aos veículos empenhados nesta linha, à própria operação e à administração do serviço. Após a aplicação do questionário, os resultados das respostas dadas pelo especialista para a linha em questão encontram-se resumidos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Estimativa final dos valores dos parâmetros quantitativos

	ESPECIALISTA
Idade média da frota	1 ano
Consumo médio de combustível em litro por passageiro por quilômetro	0,02 l/pass/km
Número de programas de manutenção e regulagem do motor e exaustor aplicados aos veículos por mês	1 unidade/mês
Número de programas de educação dos motoristas para melhor se relacionarem com os usuários disponibilizados por mês pela empresa	2 unidades/mês
Conforto	0,80 m ² / passageiros no vão central
Número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais	1 unidade/veículo
Número de equipamentos de segurança presentes nos veículos	3 unidades/veículo
Frequência da linha	4 min
Tarifa cobrada	R\$ 1,80
Nº de equipamentos presentes nas paradas	2 unidades/parada
Quantidade de produtos sólidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens	605 l/mês
Quantidade de produtos líquidos utilizados nas oficinas de manutenção/garagens	560 kg/mês

Para os parâmetros qualitativos foi elaborado um outro questionário aplicado a usuários da linha em estudo, onde, após a exposição do problema, os mesmos atribuíram um grau, numa escala crescente de 0 a 10, correspondente à influência estimada dos parâmetros analisados. As respostas dos 10 usuários estão apresentadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Estimativa final dos valores dos parâmetros qualitativos

	USUÁRIOS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de combustível utilizado	8	6	9	2	5	4	6	10	6	5
Segurança	6	7	5	4	7	5	7	7	5	4
Limpeza	8	8	8	4	8	7	7	8	7	6
Adequabilidade do veículo à rota	7	6	6	3	7	4	5	8	4	5
Tempo de viagem	7	7	7	3	10	3	8	7	6	6
Localização dos pontos de parada	5	4	8	4	8	6	7	7	8	7
Identificação das linhas nas paradas	4	3	5	2	10	2	6	4	2	4

Com as respostas do especialista e dos usuários, determinaram-se os graus de certeza dos termos lingüísticos de cada um dos parâmetros, por meio da utilização dos conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, tomando como base o valor estimado pelo especialista para o parâmetro quantitativo “Idade média da frota”, valor 1, quando plotado no gráfico no respectivo conjunto genérico (Fig. 4) produz o vetor lingüístico com correspondentes graus de certeza: Excelente: 0,50; Boa: 0,00; e Ruim: 0,00. Considerando o parâmetro qualitativo “limpeza”, cujo valor atribuído pelo usuário 1 foi 8, quando plotado no gráfico do conjunto *fuzzy* para os parâmetros qualitativos (Fig. 16) produz o vetor lingüístico e graus de certeza associados: Ruim: 0,00; Regular: 0,00; e Boa: 0,90.

Após a obtenção destes vetores, com os respectivos graus de certeza, é possível realizar a inferência *fuzzy*. Utilizando as Eq. 1 e 2 mostradas anteriormente e analisando conjuntamente os parâmetros deste primeiro bloco de inferência, tem-se os seguintes vetores lingüísticos com graus de certeza associados:

$$\text{GdC (Indicador de poluição pela frota)} = (\text{EXCELENTE}=0,40, \text{BOM}=0,09 \text{ e } \text{RUIM}=0,00)$$

O processo de defuzzificação é a última etapa de um sistema *fuzzy*. No presente trabalho, utilizou-se o método do centro dos máximos. Tomando como base o conjunto *fuzzy* para defuzzificação apresentado na Fig. 2 e utilizando a Eq. 3, determina-se o índice de desempenho ambiental pretendido. Na Tabela 6 apresentam-se os valores obtidos com a defuzzificação.

Tabela 6 - Índice de desempenho ambiental (especialista x usuários) para a linha

	VETORES LINGÜÍSTICOS	USUÁRIOS									
		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
ESPECIALISTA E1	RUIM	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,29	0,00	0,00	0,29	0,00
	BOM	0,25	0,20	0,25	0,19	0,28	0,35	0,25	0,25	0,35	0,35
	EXCELENTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	D =	0,50	0,50	0,50	0,34	0,50	0,39	0,50	0,50	0,39	0,50

O valor final da linha de ônibus é definido pela média aritmética dos 10 valores calculados (1 especialista x 10 usuários), isto é:

$$\text{GdC (índice de desempenho ambiental)} = (\text{RUIM} = 0,09; \text{BOM} = 0,27; \text{EXCELENTE} = 0,00)$$

Usando o conjunto *fuzzy* correspondente (Fig. 2) e aplicando a Eq. 3, têm-se:

$$\text{Índice de Desempenho Ambiental} = \frac{(0,09 \times 0,25) + (0,27 \times 0,50) + (0,00 \times 0,75)}{(0,09 + 0,27 + 0,00)}$$

$$\text{Índice de Desempenho Ambiental} = 0,44$$

O valor do índice de desempenho ambiental pertence à [0,1], considerando-se que, quanto mais próximo de 1 for o valor, melhor o desempenho ambiental. Propõe-se, para avaliar o referido desempenho do sistema de transporte público urbano por ônibus, a escala proposta por Alves (2006), a qual é apresentada na Tabela 7:

Tabela 7 - Interpretação da escala do índice de desempenho ambiental

ÍNDICE	DESEMPENHO AMBIENTAL
$0 \leq x \leq 0,20$	Muito baixo
$0,20 \leq x \leq 0,40$	Baixo
$0,40 \leq x \leq 0,60$	Médio
$0,60 \leq x \leq 0,80$	Alto
$0,80 \leq x \leq 1$	Muito alto

Utilizando a escala proposta na Tabela 7, observa-se que o valor encontrado é considerado médio e portanto a empresa operadora deve buscar os pontos ambientalmente frágeis da linha a fim de melhorar este desempenho.

Após avaliação dos valores obtidos em todas as camadas da arquitetura empregada, podem ser citados como pontos ambientalmente frágeis associados à linha sob análise, o reduzido número de programas de educação aplicados aos motoristas para melhor se relacionarem com os usuários disponibilizados por mês pela empresa, o conforto oferecido, diretamente relacionado com a frequência da linha, o número de equipamentos disponíveis nos veículos e que auxiliam aos portadores de necessidades especiais, o insuficiente número de equipamentos presentes nos pontos de paradas, assim como a falta de identificação da linha nos mesmos.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou como a teoria dos conjuntos *fuzzy* proposta por Zadeh em 1965, pode ser utilizada para analisar aspectos relacionados ao serviço de transporte público urbano por ônibus, considerando a recuperação dos passivos ambientais existentes, além de demonstrar o potencial desta teoria para problemas que apresentem graus de incerteza e subjetividade. Porém, quando se elabora um procedimento valendo-se do uso da lógica *fuzzy*, observa-se que a subjetividade é inerente a todo o processo, pois a mesma é intimamente baseada em “opiniões” de especialistas e usuários. Podem ser citadas por exemplo, as etapas de agrupamento de parâmetros e da construção das regras, na qual são associados fatores de certeza. Para amenizar tal subjetividade, são adotados pesos no processo de defuzzificação.

A sistematização do procedimento proposto inclui uma série de questionários a serem aplicados na operadora, nos usuários das linhas e em especialistas de meio ambiente, permitem a obtenção do índice mencionado. O índice de desempenho ambiental do serviço de transporte público urbano por ônibus proposto neste trabalho é de grande utilidade tanto para empresas operadoras do serviço quanto para o poder público. Para a primeira, este índice auxilia na detecção e ajuste dos aspectos que influenciam negativamente o seu posicionamento no mercado e o meio ambiente, evitando com isso multas aplicadas pelo poder público pela criação de passivo ambiental. Já com relação ao poder público, este pode ter o processo de fiscalização simplificado e sistematizado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alves, G. K. A., 2006. *Sustentabilidade ambiental dos sistemas de transportes públicos em centros urbanos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME.
- [2] Cury, M. V. Q., 1999. *Modelo Heurístico Neuro-fuzzy para avaliação humanística de projetos de transporte urbano*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [3] Filippo, S., Silva, V., Machado, A., Cosenza, C., Ribeiro, S. (2005) Lógica Fuzzy para obtenção do índice de prioridade para intervenção no passivo ambiental de segmentos de rodovias pavimentadas. In *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET – XIX)* Anais eletrônicos, CD. Recife.
- [4] Goudard, B., 2001. *Avaliação Ambiental de Alternativas de Projetos de Transporte Rodoviário com o uso da Lógica Fuzzy*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME.
- [5] Fogliatti, M. C., 2004. *Avaliação de Impactos Ambientais: aplicação aos sistemas de transporte*. Interciência.
- [6] IBOPE. Site do Instituto Brasileiro de Opinião Pública e Estatística. Disponível: <http://www.ibope.com.br/>[capturado em 10/04/2006]
- [7] Jamshidi, M., 1997. *Applications of fuzzy logic: towards high machine intelligence quotient systems*. Prentice Hall.
- [8] Komarova, A. D. H., 2000. *Transporte multimodal de cargas: análise de alternativas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME.
- [9] SEMOB. Site da Secretaria de Transporte e da Mobilidade Urbana. Disponível: <http://www.cidades.gov.br/>[capturado em 05/04/2005]
- [10] Paiva, K., 2004. *Subsídios para implementação de um sistema de gestão ambiental para operação de rodovias*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME.
- [11] Von Altrock, C., 1995. *Fuzzy logic and neurofuzzy applications explained*. Prentice Hall.